

де  $N$  – кількість комутаторів у кільці.

**Висновки.** Отримано аналітичний вираз для оцінки максимальної кількості потоків в трактах передачі кільцевої мережі для довільної кількості вузлів (комутаторів). Цей аналітичний вираз дозволяє визначити необхідну пропускну здатність трактів передачі кільцевих мереж Ethernet з урахуванням роботи протоколу STP.

**Список літератури:** 1. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст]: учебник для вузов / *В.Г. Олифер, Н.А. Олифер.* – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 944 с. 2. *Амато.* Основы организации сетей Cisco, том 1 [Текст]: учебное пособие для студентов сетевой академии Cisco / *Амато, Вито.* – испр. изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 512 с. 3. *Кеннеди К.* Принципы коммутации в локальных сетях Cisco [Текст]: учебное пособие для студентов сетевой академии Cisco / *К.Кеннеди, К.Гамильтон.* – Издательство «Вильямс», 2003. – 976 с. 4. *Ирвин Дж.* Передача данных в сетях: инженерный подход [Текст]: учебное пособие / *Дж. Ирвин., Д. Харвин.* Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 448 с.

*Надійшла до редколегії 20.10.2011*

УДК 621.396

***В.В.КНЯЗЕВ***, канд. техн. наук, зав. отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;  
***А.Э.ГОРЮШКИН***, аспирант, НТУ «ХПИ»;  
***А.Ю.СКОБЛИКОВ***, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕПРЕМНИКА**

У статті представлені результати чисельного моделювання розподілу напруженості електричного поля по поверхні блискавкоприймача залежно від різних форм стержня. Розглянуті стержневі блискавкоприймачі, в перерізі яких круг, квадрат і правильний шестикутник. Сформульована гіпотеза про перевагу блискавкоприймача квадратного перерізу.

In the article the results of numeral design of distribution of the electric-field tension are presented for the lightning terminal surface on the different forms of bar. The lightning terminal is considered, in the section of which circle, square and hexagon. A hypothesis is set forth about advantage of lightning terminal of square section.

В статье представлены результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля по поверхности молниеприемника в зависимости от различных форм стержня. Рассмотрены стержневые молниеприемники, в сечении которых круг, квадрат и правильный шестиугольник. Сформулирована гипотеза о преимуществе молниеприемника квадратного сечения.

**Введение.** Основой систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых попаданий молнии являются металлические конструкции в виде стержневых, тросовых и сеточных молниеприемников. Рекомендации по устройству таких систем и оценке их защитных свойств содержатся в стандарте Международной электротехнической комиссии IEC 62305-3: 2006 [1]. В отличие от упомянутых выше систем, которые условно можно назвать «пассивными», в мире предпринимаются настойчивые попытки создания «активных» устройств, обеспечивающих существенное увеличение размеров зоны защиты, по сравнению с зоной защиты классического молниеприемника Франклина (FLR). К числу таких устройств относятся, так называемые «Early streamer emission air terminals» (ESE), которые обеспечивают более быстрое по сравнению с FLR создание встречного стримера, способствующего перехвату молнии. Декларируемый радиус защиты ESE молниеприемников пропорционален времени опережения. Методика определения времени опережения регламентируется стандартом Франции NF C 17-102: 1995 [2]. При проведении испытаний регистрируется время пробоя воздушного промежутка, которое отсчитывается от момента начала нарастания импульсного электрического поля. Критерием оценки эффективности ESE молниеприемника является среднее арифметическое значение  $\Delta T$ , полученное в результате статистической обработки 100 измерений.

Быстродействие молниеприемника зависит от степени ионизации окружающего воздушного пространства. Если ионизация активная, то создается облако зарядов, которое затрудняет начало прорастания встречного лидера. Если ионизация слабая, отсутствуют заряды, необходимые для формирования лавины, что приводит к увеличению времени ожидания. Следовательно, можно предположить, что существует определенный уровень тока короны с молниеприемника, являющийся оптимальным с точки зрения времени формирования встречного лидера. Ток короны возникает при достижении напряженности электрического поля на поверхности стержня критического значения, равного 3,0 МВ/м. В работе представлены результаты расчетной оценки уровня напряженности электрического поля на поверхности стержневых молниеприемников различной формы.

**Цель работы** определение закономерности распределения напряженности электрического поля на поверхности стержневых молниеприемников различной формы.

**Постановка задачи.** Расчетная модель состоит из 2 дисковых электродов и стержневого молниеприемника, помещенных в воздушное пространство (см. рис. 1). Исходные данные модели:

Радиус стержня  $r = 0.05\text{ м}$ ; Высота стержня  $h = 2\text{ м}$ ;

Высота между электродами  $H = 5\text{ м}$ ; Радиус электродов  $R = 10\text{ м}$ ;

Потенциал верхнего электрода  $U = 10\,000\text{ В}$ ;

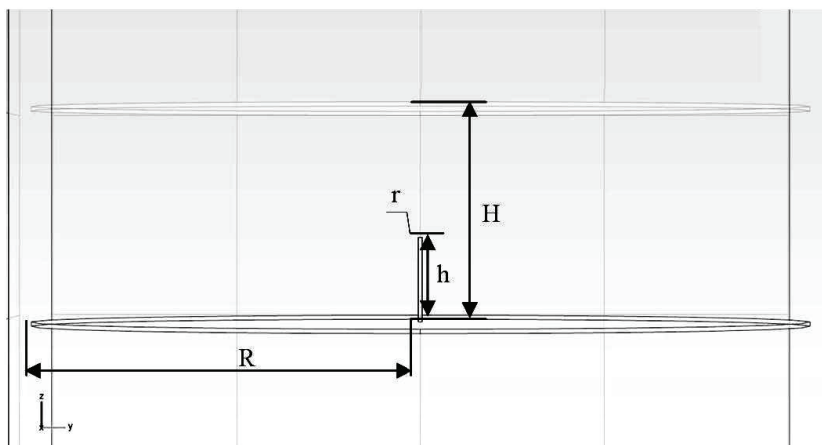


Рисунок 1 – Расчетная модель системы электродов

Материал электродов и стержня – медь. Форма сечения стержня: круг, квадрат, шестиугольник и восьмиугольник.

**Результаты расчетов.** Для решения поставленной проблемы осуществлен расчет нескольких вариантов задачи отличающихся вариацией одного из параметров конструкции системы. Остальные параметры сохранялись соответствующими исходным. Все расчеты проведены в трехмерном пространстве.

1. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня с сечением в форме круга в зависимости от вариации высоты между электродами ( $H$ ). Расстояние между электродами изменялось в диапазоне от 4.5 до 8 метров. Результаты моделирования предоставлены на рис. 2.

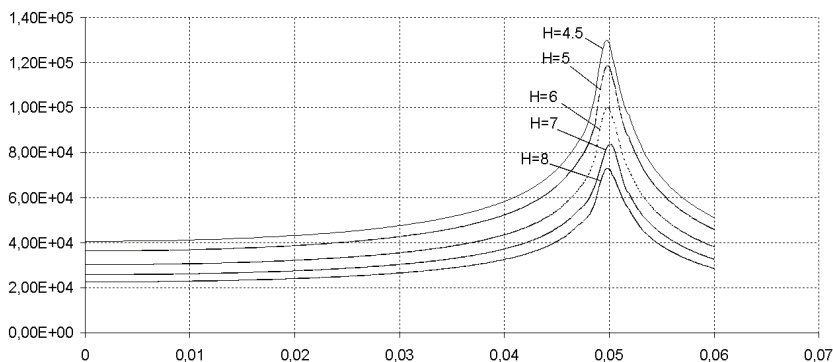


Рисунок 2 – Изменение напряженности поля системы в зависимости от изменения высоты между электродами (стержень с сечением круг)

На рис. 2 представлено распределение значения напряженности электрического поля вдоль радиуса стержня на его торцевой поверхности (до  $r = 0,05$ ) и далее в воздушном пространстве. Как видно из графиков с увеличением расстояния между электродами напряженность поля на поверхности стержня также уменьшается. В данном случае, этот эффект связан с тем, что разность потенциалов между плоскостями полеобразующей системы оставалась одинаковой ( $U = 10^4$  В). При пересчете результатов на условия одинакового значения напряженности электрического поля ( $E = 2$  кВ/м), расхождение между кривыми существенно уменьшилось.

2. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня с сечением в форме круга в зависимости от вариации радиуса стержня ( $r$ ). Изменение радиуса стержня производилось в диапазоне от 0,02 до 0,06 м.

Отчетливо видно, что с уменьшением площади торца молниеприемника растет напряженность электрического поля, формирующегося вблизи его торца. Зависимость напряженности от радиуса достаточно точно описывается кривой второго порядка (гиперболой).

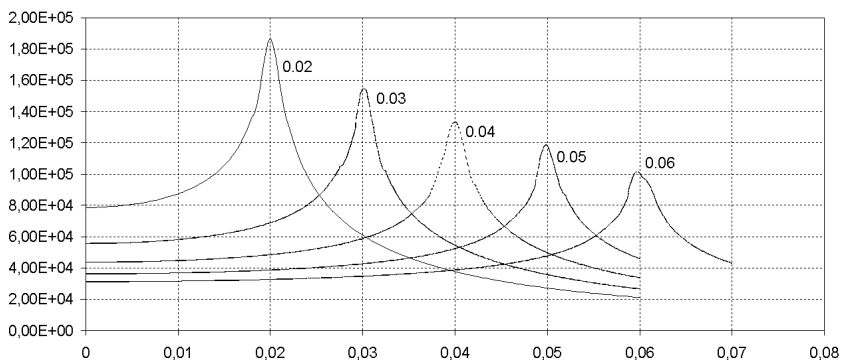


Рисунок 3 – Изменение напряженности поля в зависимости от изменения радиуса стержня

3. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня с сечением в форме круга ( $r = 0,05$  м) в зависимости от вариации высоты стержня ( $h$ ). Высота стержня изменялась в диапазоне от 1 м до 4 м при постоянном значении расстояния между плоскостями ( $H = 5$  м).

Как видно из рис. 4 при увеличении высоты стержня молниеприемника растет максимальное значение напряженности электрического поля прямо пропорционально высоте стержня. Следовательно, при таких соотношениях высоты стержня и расстояния между плоскостями не наблюдается эффекта близости. Иными словами, напряженность поля на торце стержня определяется его высотой и значением напряженности электрического поля, в котором стержень находится.

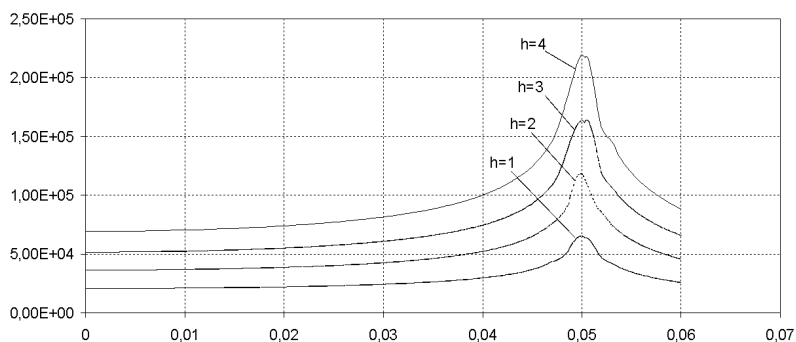


Рисунок 4 – Изменение напряженности поля в зависимости от изменения высоты стержня.

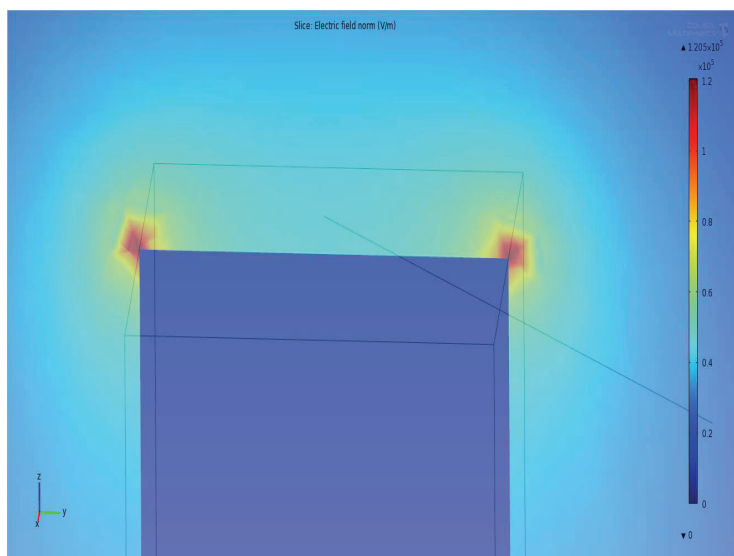


Рисунок 5 – Результат решения задачи для стержня квадратного сечения (радиус описанной окружности 0,05 м)

4. Исследовано распределение напряженности поля на поверхности стержня для стержней с различной формой сечения. Выбрано четыре формы сечения стержня: круг, квадрат, правильный шестиугольник и правильный восьмиугольник. Для иллюстрации на рис. 5 и рис. 6 представлены результаты решения трехмерных моделей для стержневых молниеприемников различных форм. Все графики напряженности поля в построены вдоль прямой, лежащей в плоскости торца стержня, проходящей от его центра к углу стержня. Графики изменения напряженности поля в зависимости от формы стержня

показаны на рис. 7. Для круглого сечения распределение дано в вдоль радиуса торцевой поверхности.

Из результатов, представленных на рис. 7, можно сделать вывод о том, что при прочих равных условиях, напряженность электрического поля на угле стержневого молниеприемника квадратного сечения максимальна по сравнению с другими рассмотренными формами сечения. Этот вывод важен для выбора молниеприемника, которому будет придан статус образцового.

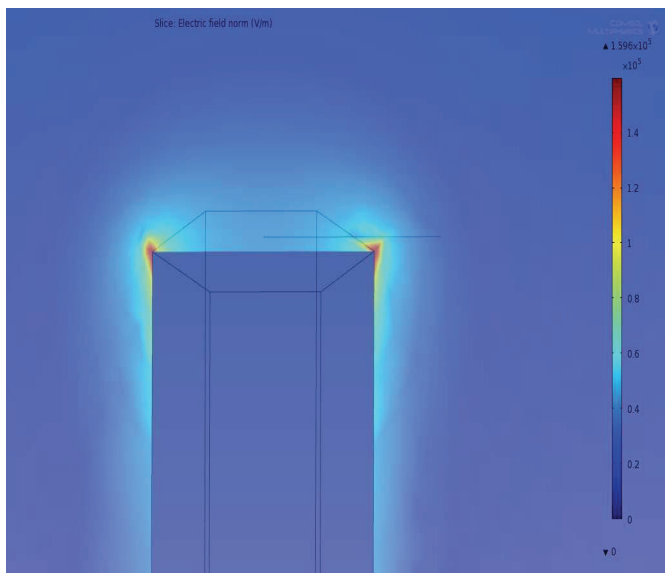


Рисунок 6 – Результат решения задачи для стержня с сечением в виде правильного шестиугольника (радиус описанной окружности 0,05 м)

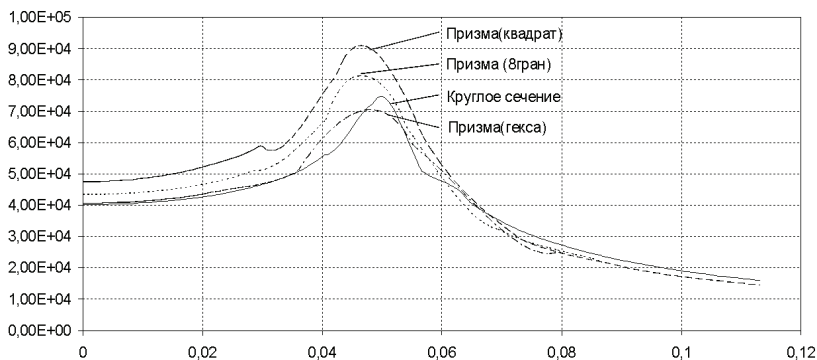


Рисунок 7 – Изменения напряженности поля в зависимости от изменения формы стержня

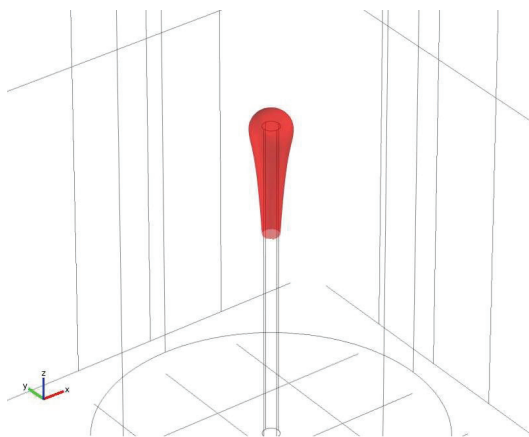


Рисунок 8 – Иллюстрация напряженного объема стержня молниеприемника круглого сечения

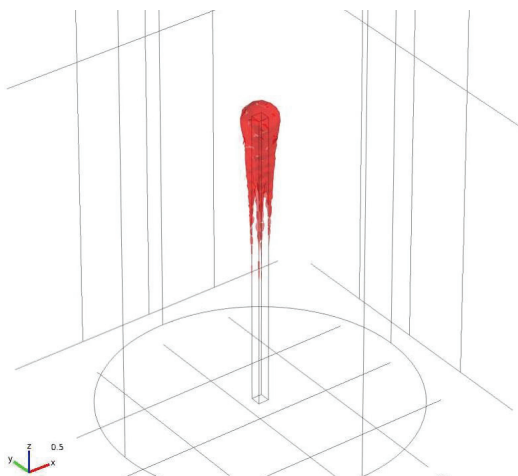


Рисунок 9 – Иллюстрация напряженного объема стержня молниеприемника квадратного сечения

Однако, локальное высокое значение напряженности электрического поля само по себе не является достаточным условием обеспечения пробоя воздушного промежутка. Для этого, по аналогии с работой [3], необходимо наличие определенного «напряженного объема», в котором значение напряженности электрического поля превосходит значение  $E_{кр} = 30 \text{ кВ/см}$ , при котором возникает ионизация воздуха. Проведено сравнение критических объемов для стержневых молниеприемников с круговым и квадратным сечением. Оказалось, что незначительное превышение характерно для случая квадратного се-

чения. В качестве иллюстрации, на рис. 8 и рис. 9 представлены результаты расчета напряженного объема для стержней круглого и квадратного сечений, соответственно. Следовательно, и по этому параметру стержень квадратного сечения имеет преимущество.

5. Типичной формой молниеприемника Франклина является круговой стержень, с острым в виде конуса концом. Расчет напряженности поля на поверхности острия стержня проведен вдоль образующей конуса стержня. Высота острия стержня выбрана равной 0,05 и 0,1 м. (при  $r = 0,05$  м). Для иллюстрации, на рис. 10 представлено решение соответствующей задачи.

Графики напряженности поля в зависимости от изменения высоты острия стержня предоставлены на рис. 11.

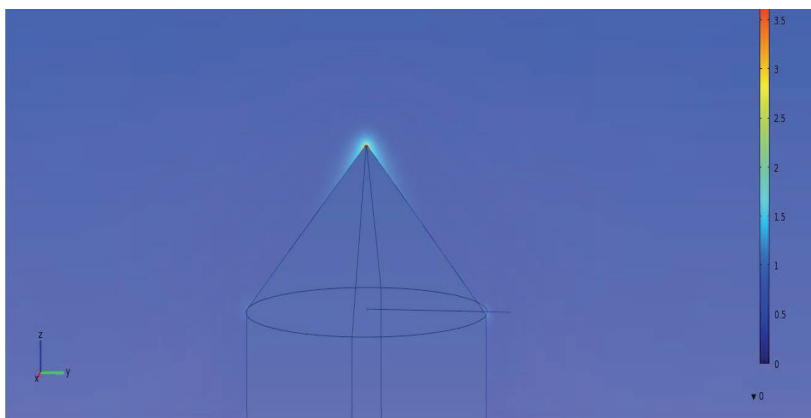


Рисунок 10 – Результат решения задачи для стержня с острием

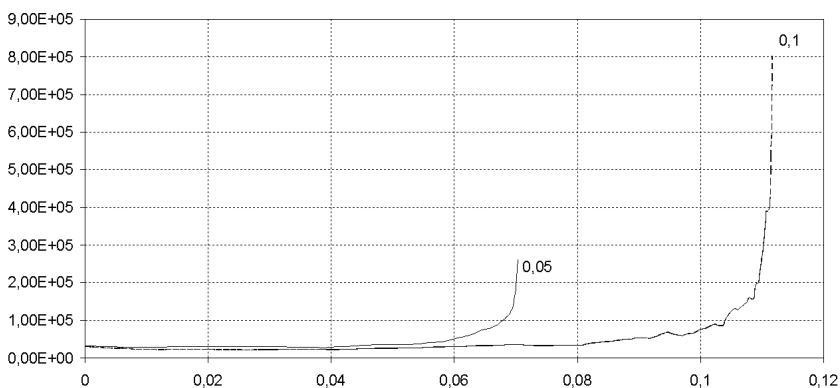


Рисунок 11 – Изменение напряженности поля в зависимости от изменения острия стержня



Исследование распределения напряженности поля на поверхности такого молниеприемника показало существенное превышение напряженности электрического поля на вершине острого конуса по сравнению с рассмотренными ранее вариантами стержней. Однако, величина «напряженного объема» не превосходит значений, характерных для других вариантов молниеприемников. Из указанных выше расчетов видно, что для достижения максимального значения напряженности поля, а также напряженного объема на поверхности стержневого электрода при прочих равных условиях целесообразно использовать стержневой молниеприемник с квадратным сечением.

**Выводы.** На основании результатов численного моделирования напряженности электрического поля на поверхности стержневого молниеприемника различных форм установлено, что молниеприемник квадратного сечения имеет наибольшее значение напряженности электрического поля при прочих равных условиях.

Полученные результаты являются основой для построения шаблона функциональной зависимости напряженности электрического поля на поверхности стержня, что повысит эффективность реализации плана многофакторного эксперимента.

**Литература.** 1. IEC 62305-3: 2006. Protection against Lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. 2. NF C 17-102: 1995. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. 3. Рудаков В.В. Сильні електричні поля в конденсаторних конструкціях та удосконалення високовольтних силових конденсаторів». Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.13. – Техніка сильних електричних та магнітних полів. – Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1999.

*Поступила в редколлегию 14.10.2011*